

基于 BS 标准与 ASME 标准的不锈钢地铁车辆 车体关键焊缝疲劳强度分析*

李晓峰¹ 崔志军¹ 邵晨晨²

(1. 大连交通大学机车车辆工程学院, 116028, 大连; 2. 中国铁路沈阳局集团有限公司, 110101, 沈阳//第一作者, 教授)

摘 要 基于子模型技术对某不锈钢地铁车辆一位端牵引梁下盖板与立板连接处的关键焊缝进行研究, 并运用 BS(英国标准)和 ASME(美国机械工程师协会)标准对该条焊缝进行评估。通过评估分析可知:选择合适的焊接接头和焊缝等级是 BS 标准评估时的重要环节;而准确定义焊缝细节则是 ASME 标准评估时的重要环节。综合考虑,BS 标准评估工作量较小,适合进行整车焊缝的评估;而 ASME 标准前期定义焊缝的工作量巨大,但避免了人为选择焊接接头及等级这种随机误差,准确性相对较高,适合进行关键焊缝的研究。

关键词 地铁车辆车体; 关键焊缝; 疲劳强度; BS 标准; ASME 标准

中图分类号 U270.6;TG405

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.10.008

Fatigue Strength Analysis of Key Welds on Stainless Steel Metro Vehicle Body Based on BS Standard and ASME Standard

LI Xiaofeng, CUI Zhijun, TAI Chenchen

Abstract Based on the sub-model technology, the key welding joints between the lower cover plate and the vertical plate of a stainless steel metro car traction beam are studied, BS standard (British Standard) and ASME (American Society of Mechanical Engineers) standard are used to evaluate the welds. Through evaluation and analysis, it is made clear that the selection of appropriate welding joint and welding grade is an important part in BS standard evaluation; and the accurate definition of welding details is an important part in ASME standard evaluation. Considering comprehensively, the workload of BS standard evaluation is relatively small, therefore is suitable for the evaluation of vehicle welds; while the workload of welding joint definition in ASME standard is huge, but has relatively higher accuracy because it can avoid the random errors of artificial selection of welding joint and grade, therefore is suitable for the research of key welds.

Key words metro vehicle body; key weld; fatigue strength; BS standard; ASME standard

First-author's address School of Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, 116028, Dalian, China

车辆在服役期内最主要的失效形式是焊接结构的疲劳破坏,因而方便、快捷、准确地预测疲劳破坏成为地铁车辆设计过程中的重要一环。目前常用的焊接疲劳分析标准主要有 BS(英国标准)、IIW(国际焊接学会)标准,以及包含结构应力法、主 S-N 曲线法的 ASME(美国机械工程师协会)标准。其中,BS 标准和 ASME 标准都可以用来评估钢结构焊接接头。本文以某不锈钢地铁车辆一位端牵引梁下盖板与立板连接处的关键焊缝(以下简称“关键焊缝”)为研究对象,运用 BS 标准和 ASME 标准对其进行疲劳分析,并对两种疲劳分析方法进行对比。

1 地铁车辆车体子模型的建立与关键焊缝选取

由于所研究的关键焊缝位于一位端牵引梁下盖板与立板焊接处,因此为了减小计算工作量,利用基于圣维南原理的子模型技术^[1]将包含该条关键焊缝的车体部位截取出来。截取的地铁车辆车体子模型和选取的关键焊缝如图 1~2 所示。



图 1 截取的地铁车辆车体子模型

* 国家重点研发计划项目(2017YFB1201303)

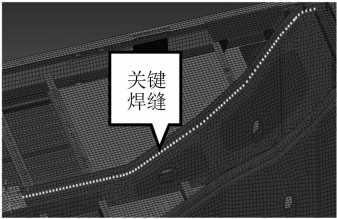


图 2 选取的关键焊缝

2 基于 BS 标准的关键焊缝疲劳强度分析

2.1 BS 标准及其原理

BS 标准是国际通用的疲劳评估标准。在该标准中使用了应力范围来参与疲劳评估。研究表明使用应力范围来评估焊接接头的疲劳性能是科学的^[2]。

依据 BS 7608—1993,所施加应力 S_r 与达到疲劳破坏的循环数 N 之间的关系如下:

$$\log N = \log C_0 - d\sigma - m_0 \log S_r \tag{1}$$

式中:

- C_0 —— S_r - N 曲线常数;
- d ——取 2,低于均值的标准偏差的数量;
- σ ——标准偏差;
- m_0 —— S_r - N 曲线斜率。

该标准中各种焊接接头对应疲劳强度的高低以疲劳等级表示,分别为 B、C、D、E、F、F₂、G、W、S、T 级。

在 BS 7608—1993 标准中,考虑低应力循环时,损伤比计算公式^[3]为:

$$S_r \geq S_0, \frac{n_0}{N} = \frac{n_0}{10^7} \left(\frac{S_r}{S_0} \right)^{m_0} \tag{2}$$

$$S_r \leq S_0, \frac{n_0}{N} = \frac{n_0}{10^7} \left(\frac{S_r}{S_0} \right)^{m_0+2} \tag{3}$$

式中:

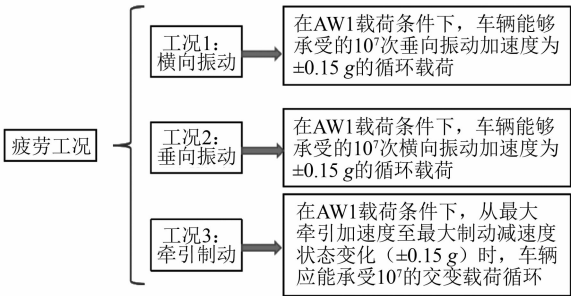
- n_0 ——待评估点 S_r 发生的次数;
- S_0 ——评估点的 S_r - N 曲线拐点的应力。

2.2 基于 BS 标准的关键焊缝疲劳强度分析结果

该不锈钢地铁车辆的疲劳工况有 3 种,如图 3 所示。计算关键焊缝在 3 种疲劳工况作用下的第一主应力,计算结果及应力云图如图 4 所示。

与 BS 标准所给定的焊接接头类型进行对比,将该条关键焊缝的焊接形式定为角焊,且初步选定其焊接等级为 E 级/F 级,并利用式(2)一式(3)计

算各工况下的损伤比,具体数据见表 1。



注: AW1为满座

图 3 3 种疲劳工况

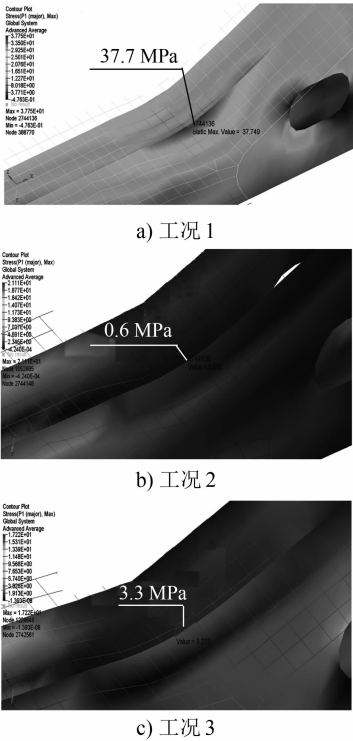


图 4 各工况下关键焊缝应力云图

表 1 各工况下关键焊缝疲劳强度结果对比 MPa				
焊接形式及等级	计算项目	工况 1	工况 2	工况 3
角焊 E	应力范围	37.70	0.60	3.30
	损伤比	0.33	0	0
角焊 F	应力范围	37.70	0.60	3.30
	损伤比	0.74	0	0

注:角焊 E 累积损伤为 0.33;角焊 F 累积损伤为 0.74

通过表 1 可知,同一条焊缝选择不同的焊接等级所得损伤比相差很大,由此可见在 BS 标准评估过程中,为焊缝选择准确的焊缝等级至关重要。

3 基于 ASME 标准的关键焊缝疲劳强度分析

3.1 ASME 标准及其原理

美国密歇根大学董平沙教授运用主 $S-N$ 曲线来预测焊接结构的疲劳寿命,该方法收录于美国 ASME 标准^[4]。该方法将结构应力通过虚功原理转化成节点力矩和节点力,则分布于焊趾处的结构应力可以通过有限元计算出的节点力求出^[5]。

在疲劳寿命评估中加入断裂力学原理,采用统一的 Paris 公式以相对裂纹长度的概念来统一两阶段裂纹增长。

$$da/dN = C(M_{kn})^n (\Delta K_n)^m \tag{4}$$

$$\Delta K_n = \sqrt{t} [\Delta \sigma_m f_m(a/t) + \Delta \sigma_b f_b(a/t)] \tag{5}$$

式中:

- a ——焊接结构边缘裂纹深度;
- t ——板的厚度;
- C ——常数;
- $m、n$ ——试验常数, m 取 3.6, n 取 2.0;
- M_{kn} ——应力强度放大因子;
- ΔK_n ——应力强度因子变化范围;
- $\Delta \sigma_m$ —— $\Delta \sigma_s$ 的膜应力范围分量, $\Delta \sigma_s$ 为结构应力变化范围;
- $\Delta \sigma_b$ —— $\Delta \sigma_s$ 的弯曲应力范围分量;
- $f_m(a/t)$ ——膜应力单独作用时 ΔK_n 的无量纲权函数;
- $f_b(a/t)$ ——弯曲应力单独作用时 ΔK_n 的无量纲权函数。

根据断裂力学理论,从小裂纹到穿透厚度 t 时疲劳寿命预测表达式为:

$$N = \int_{a/t=0}^{a/t=1} \frac{td(a/t)}{C(M_{kn})^n (K_n)^m} = \frac{1}{C} t^{1-m/2} (\sigma_s)^{-m} I(r_0) \tag{6}$$

式中:

- σ_s ——结构应力;
- $I(r_0)$ ——载荷弯曲比 r_0 ($r_0 = \Delta \sigma_b / \Delta \sigma_s$) 的无量纲函数。

$$I(r_0) = \int_{a/t=0}^{a/t=1} \frac{d(a/t)}{(M_{kn})^n \{ f_m(a/t) - r_0 [f_m(a/t) - f_b(a/t)] \}^m} \tag{7}$$

令:

$$\Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{(2-m)/2m} \cdot I(r_0)^{1/m}} \tag{8}$$

在式(4)一式(8)的基础上,经过大量试验数据修正得到式(9):

$$\Delta S_s = C_d N^h \tag{9}$$

式中:

$C_d、h$ ——试验常数,见表 2。

表 2 钢材主 $S-N$ 曲线参数表

统计数据	C_d	h
中值	19 930.2	0.319 5
+2 σ	28 626.5	0.319 5
-2 σ	13 875.7	0.319 5
+3 σ	34 308.1	0.319 5
-3 σ	11 577.9	0.319 5

注: σ 表示钢材应力标准差

主 $S-N$ 曲线法中的 $S-N$ 曲线是结合了 1 200 多个试验数据而形成的一条窄带,这些试验数据包含材料、板厚、接头类型、载荷条件等重要因素。 $S-N$ 曲线见文献[2]。

设材料在某级应力下达到破坏时的应力循环次数为 N ,经 n_1 次应力循环而疲劳损伤吸收的净功为 W_1 。根据 Miner 线性损伤理论^[6]有:

$$\frac{W_1}{W} = \frac{n_1}{N} \tag{10}$$

式中:

W_1 ——经 n_1 次应力循环而疲劳损伤吸收的净功。

对 p 级加载情况,材料疲劳累积损伤 D 可表示为:

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_p}{N_p} = \sum_{i=1}^p \frac{n_i}{N_i} (i = 1, 2, \dots, p) \tag{11}$$

3.2 基于 ASME 标准的关键焊缝疲劳强度分析结果

在应用主 $S-N$ 曲线法对焊缝进行评估时,对焊缝的定义有两种情况:一是直接以单元连接处作为焊缝来进行定义;二是根据焊缝实际尺寸在单元连接处建立焊趾单元。两种情况都把较薄处板的一侧作为开裂方向来定义焊缝走向,接着才能通过计算提取焊缝节点力。定义好的关键焊缝如图 5 所示。

将两种不同定义形式的焊缝子模型在 ANSYS 软件中进行计算。提取该条焊缝在 3 种疲劳工况下的节点力,运用 FE-WELD 软件来计算其等效结构

应力。将两种不同定义形式焊缝的等效结构应力进行对比,如图 6 所示。

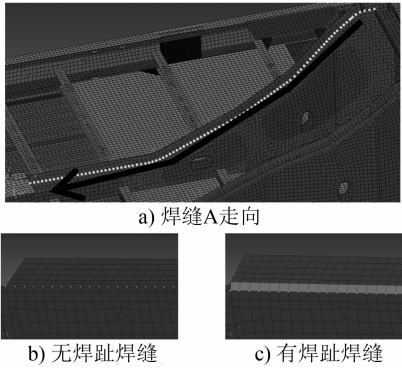
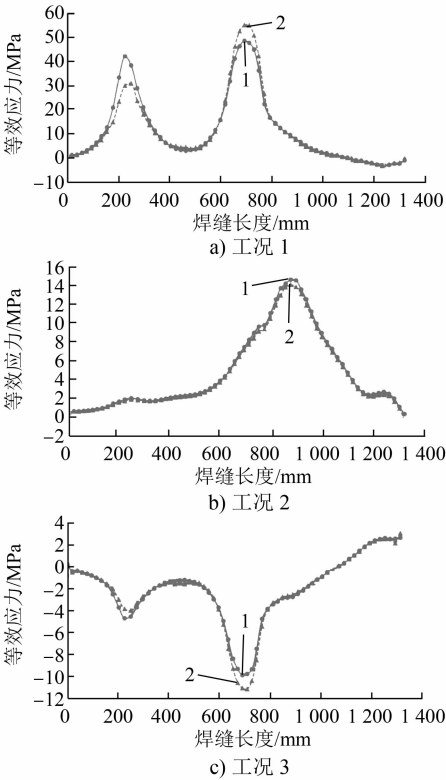


图 5 关键焊缝 A 走向及其细节



注: 1——无焊趾焊缝; 2——有焊趾焊缝

图 6 各工况下关键焊缝等效应力变化曲线图

在得到关键焊缝等效结构应力的基础上,选用 -2σ 的主 $S-N$ 曲线,计算两种不同形式的关键焊缝在各工况下的疲劳寿命和总损伤比,结果见表 3。

表 3 主 $S-N$ 曲线法计算的关键焊缝的疲劳寿命和总损伤比

焊缝形式	疲劳寿命/ 10^7 次			总损伤比
	工况 1	工况 2	工况 3	
无焊趾焊缝	4.9	1 742	701	0.21
有焊趾焊缝	3.3	2 006	494	0.31

通过表 3 可知,在 3 种疲劳工况下,无焊趾焊缝的累积损伤比要小于有焊趾焊缝;考虑有焊趾焊缝模拟了实际焊缝中的焊趾,因此有焊趾焊缝的评估结果更准确一些。

4 结论

本文以某不锈钢地铁车辆为基础,利用子模型技术截取一位端部分有限元模型作为计算模型,运用 BS 标准和 ASME 标准评估牵引梁下盖板与立板处关键焊缝,并对两个标准下的评估结果进行对比,得出如下结论:

- 1) 应用 BS 标准评估焊缝疲劳寿命时,无需定义焊缝,评估时需考虑焊接热影响区,且需要依据标准为每条焊缝选定合适的焊接接头形式及等级,即一种焊接等级对应一条 $S-N$ 曲线;而应用 ASME 标准中的主 $S-N$ 曲线法评估时,需对每条焊缝进行定义,但该方法中只含有一条 $S-N$ 曲线,因此无需人为选择焊接接头形式及等级。
- 2) ASME 标准评估时需人工定义焊缝单元,且在运用 FE-WELD 软件计算时要求有较高的网格质量,前期工作量巨大,适合对关键焊缝的精细研究;BS 标准评估时由于需要人为选定焊接接头形式及等级,前期工作量相对于 ASME 标准而言较小,适合整车焊缝的评估。
- 3) 通过对比两个标准的疲劳评估结果可以看出,在运用 BS 标准时会因焊接接头细节选取的随机性对评估结果造成很大的偏差;而运用 ASME 标准时,因其网格不敏感性^[2]以及主 $S-N$ 曲线的唯一性使得评估结果更为准确、稳健。

参考文献

[1] 杨宏,王宏,商跃进.基于子模型技术的转向架构架疲劳寿命预测[J].机械研究与应用,2018(1):32.

[2] 兆文忠,李向伟,董平沙.焊接结构抗疲劳设计理论与方法[M].北京:机械工业出版社,2017.

[3] 马纪军,杨帅,于金朋,等.基于名义应力法的动车组车体净水箱吊装部件疲劳强度分析[J].大连交通大学学报,2015(4):18.

[4] 孙屹博,高峰,杨鑫华,等.基于 ASME 标准的机车制动闸瓦托焊接疲劳分析[J].大连交通大学学报,2014(4):65.

[5] 王亦军,董奇志,肖守讷,等.等效结构应力法的焊接疲劳评估[J].河南科技大学学报,2017(8):16.

[6] 岳译新,刘永强,李晓峰.基于主 $S-N$ 曲线法的地铁车体焊缝疲劳分析[J].机电传动,2012(5):79.

(收稿日期:2019-01-02)